



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 195 16 842 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
G01 M 11/08

②1 Aktenzeichen: 195 16 842.9
②2 Anmeldetag: 8. 5. 95
④3 Offenlegungstag: 30. 11. 95

DE 195 16 842 A 1

③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1
06.05.94 DE 44 16 080.1

⑦1 Anmelder:
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

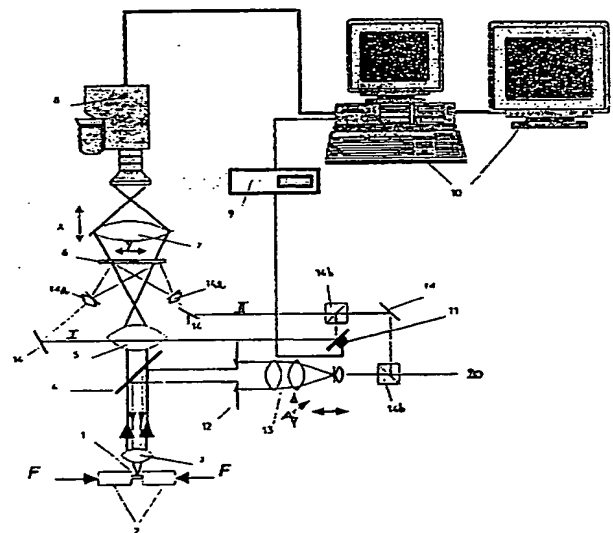
⑦4 Vertreter:
Leonhard und Kollegen, 80331 München

⑦2 Erfinder:
Großer, Volker, 09126 Chemnitz, DE; Helmert,
Jürgen, 09111 Chemnitz, DE; Bombach, Christine,
09123 Chemnitz, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Bestimmung mechanischer Verschiebungsfelder an Siliziumobjekten

⑤7 Das Ziel der Erfindung besteht darin, ein Verfahren und eine Anordnung anzugeben, mit denen mechanische Verschiebungsfelder an diffus streuenden Festkörpern mikroskopischer Dimension mit sehr hoher Qualität bestimmt werden können, um aus den erhaltenen Meßwerten das Spannungsfeld des Meßobjektes (infolge konstanter thermischer oder mechanischer Belastung) ermitteln zu können. Erreicht wird das mit einem Verfahren, bei dem auf einer Hologrammplatte (6) die vollständige erste optische Information über das mechanisch unbelastete Meßobjekt (1) aufgezeichnet wird; das Meßobjekt (1) mit einer Belastungseinrichtung (2) belastet (F) wird und die vollständig zweite optische Information auf derselben Hologrammplatte (6) aufgezeichnet wird; die im Bild stabilisierte Hologrammplatte - z. B. nach Entwicklung oder dergleichen - an der Stelle der Aufzeichnung gleichzeitig mit zwei Referenzstrahlen (I, II) bestrahlt wird, um mit einem Bildverarbeitungs-System (10) die sich durch Interferenz bildenden Interferenzstreifenmuster auf der 3-D-Abbildung des Meßobjektes (1) aufzuzeichnen.



DE 195 16 842 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zur Ermittlung von mechanischen Verschiebungsfeldern und daraus abgeleiteter Größen an diffus streuenden Festkörpern mikroskopischer Dimension und zur effektiven Weiterverarbeitung der Meßdaten für Aussagen über die Zuverlässigkeit von Mikrobauteilen, insbesondere aus Halbleitern (z. B. Silizium).

Es ist bekannt, mittels der holographischen Interferometrie mechanische Verschiebungsfelder zu messen (FMC-Series No. 37, 1987, Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Mechanik, S. 16). Ebenfalls bekannt ist der Einsatz des Phasenshift-Verfahren in der holographischen Interferometrie (Marwitz, H.: Praxis der Holographie/Grundlagen, Standart- und Spezialverfahren, expert verlag 1990) sowie eine Anordnung zur Durchführung hologramminterferometrischer Auflichtmikroskopie (FMC-Series No. 26, Karl-Marx-Stadt, 1987, Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Mechanik, S. 192).

Das Ziel der Erfindung besteht darin, ein Verfahren und eine Anordnung anzugeben, mit denen mechanische Verschiebungsfelder an diffus streuenden Festkörpern mikroskopischer Dimension mit sehr hoher Qualität bestimmt werden können, um aus den erhaltenen Meßwerten das Spannungsfeld des Meßobjektes (infolge konstanter Belastung) ermitteln zu können. Spannungen können dabei sowohl auf mechanischer Ursache oder auf thermischer Ursache (bei fest angeordneten Meßobjekten) beruhen. Thermische Beanspruchung bei mechanisch nicht verrückbaren oder keine Ausdehnung erlaubenden Meßobjekten (beispielsweise Verbindungsstege oder Bonding-Anordnungen) führen zwangsläufig zu den — zu erfassenden — mechanischen Spannungen.

Mit Kenntnis dieses Spannungsfeldes sind Aussagen über die Zuverlässigkeit oder Belastung der Meßobjekte möglich.

Die Aufgabe der Erfindung wird durch kohärent-optische Meßverfahren, z. B. die holographische Interferometrie, in Verbindung mit einer Phasenshift-Einheit und einem Bildverarbeitungssystem gelöst (Anspruch 1, Anspruch 11).

Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, daß das zunächst (mechanisch) unbelastete Meßobjekt über ein Auflichtsystem (Planglasilluminator und Mikroskopobjektiv) mit kohärentem Laserlicht bestrahlt wird, und das vom Meßobjekt reflektierte Licht, welches die Information über das Objekt enthält, durch die Abbildungsoptik des Auflichtmikroskops auf eine in der Zwischenbildebene stehende Hologrammplatte vergrößert abgebildet wird, dort mit dem Referenzstrahl I des holographischen 2-Referenzstrahlmoduls interferiert, und das entstehende Interferenzmuster auf der Hologrammplatte gespeichert wird. Diese enthält als Hologramm die vollständige optische Information über das mechanisch unbelastete Meßobjekt.

Danach wird das Meßobjekt mechanisch belastet, und der Vorgang wiederholt, wobei das vom belasteten Objekt kommende Licht diesmal mit dem Referenzstrahl II interferiert, und das Interferenzmuster auf derselben Hologrammplatte gespeichert wird (Anspruch 13).

Nach der Entwicklung der Hologrammplatte — moderne Hologrammplatten sind auch ohne Entwicklung stabilisierbar — wird diese wieder an die Stelle wie bei der Aufnahme gesetzt, und das Hologramm mit zwei Referenzwellen zugleich rekonstruiert.

Die dabei entstehenden Wellenfelder, die sich durch die Out-of plane Verschiebung des Objektes voneinander unterscheiden, treten dabei zueinander in Interferenz und es entsteht das vergrößerte dreidimensionale Bild des Meßobjektes überzogen mit einem Interferenzstreifenmuster. Durch einen in einem Referenzzweig eingebauten computergesteuerten Piezospiegel kann sehr präzise die Phase eines Referenzstrahles linear geschoben werden, was sich in einer Veränderung des Interferenzmusters auf dem Interferogramm des Meßobjektes äußert. Das wird durch das Phasenshiftverfahren ausgenutzt.

Über eine Videokamera werden drei holographische Interferogramme des Meßobjektes bei drei unterschiedlichen relativen Phasen in den Bildspeicher eines Bildverarbeitungssystems (BVS) gelesen und mit einfachen Algorithmen wird durch das am BVS angeschlossene Rechnersystem mit geeigneter Software die Interferenzphase des holographischen Interferogramms und daraus das mechanische Verschiebungsfeld des Meßobjektes mit hoher Genauigkeit berechnet.

Im Versuch wurden Spannungsfelder simuliert, durch Aufbringen rein mechanischer Spannungen, die im tatsächlichen Anwendungsbereich der Mikrosystemtechnik aber auch thermische Ursachen haben können (Anspruch 12).

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels erläutert und ergänzt.

Fig. 1 veranschaulicht ein Ausführungsbeispiel mit dem die mechanischen Verschiebungsfelder eines Meßobjektes 1 erfaßt werden können. Eine Hologrammplatte 6 wird einerseits beleuchtet bzw. belichtet (4, 5, 14) und andererseits (7, 8, 10) abgetastet bzw. ausgewertet. Das BVS ist durch zwei Sichtschirme 10 repräsentiert.

Das diffus streuende Meßobjekt 1, das mit Hilfe einer Belastungsvorrichtung 2 unter eine definierte mechanische Belastung gesetzt werden kann, wird über einen Planglasilluminator 4 (halbdurchlässiger Spiegel) und durch das Mikroskopobjektiv 3 beleuchtet. Dies entspricht dem in der konventionellen Auflichtmikroskopie bekannten Prinzip der Objektauflichtbeleuchtung.

Als Lichtquelle dient ein leistungsstarker Nd:YAG-Laserkopf 20 mit großer Kohärenzlänge. Um ein paralleles Lichtbündel hoher Reinheit zu erhalten, wird der Objektstrahl durch einen Kollimator 13 geleitet, der sekundäre Interferenzerscheinungen, die z. B. an Spiegeln 14, Linsen 14a oder Prismen 14b durch Mehrfachreflektion des Laserstrahles entstehen können, unterdrückt. Dieser von Raumfrequenzen freie Laserstrahl wird über eine stufenlos verstellbare Blende 12 dem bildseitigen Linsendurchmesser des Mikroskopobjektiv 3 angepaßt, um Rückreflektionen vom Mikroskopobjektiv 3, die sich im Hologramm störend bemerkbar machen zu unterdrücken.

Das vom Objekt 1 diffus gestreute und reflektierte Licht, wird vom Auflichtmikroskop-Objektiv 3 in ein paralleles Lichtbündel gewandelt und trifft auf die Tubuslinse 5, die es wieder in ein divergentes Lichtbündel wandelt.

Das Verfahren des bildseitig parallelen Strahlengangs hat den Vorteil, daß man diverse optische Elemente (z. B. Planglasilluminator 4, Filter o. ä.) in den bildseitigen Strahlengang setzen kann, ohne das die Qualität des Zwischenbildes nachhaltig beeinträchtigt wird; der Abstand von Mikroskopobjektiv 3 und Hologrammplatte 6 ist so in gewissen Grenzen frei wählbar.

Durch die Tubuslinse 5 wird das Bildfeld vergrößert, was einer Erhöhung der Auflösung gleichkommt, da das

Auflösungsvermögen eines Hologramms nur von der Anzahl der Linien, die an der Speicherung der Objektinformation beteiligt sind, abhängt.

Die Hologrammplatte 6 befindet sich an der Stelle, wo das reelle vergrößerte Zwischenbild des zunächst mechanisch unbelasteten Meßobjektes 1 entsteht. Dieses Zwischenbild wird holographisch aufgezeichnet, indem die vom Objekt 1 kommenden Lichtstrahlen mit dem Referenzstrahl I interferieren, und das dabei entstehende Interferenzmuster auf der Hologrammplatte 6 gespeichert wird.

Für die holographische Interferometrie nutzt man, auf der Hologrammplatte 6 zwei und mehr Hologramme zu speichern, die sich — wenn sie im gleichen Winkel aufgenommen wurden — bei der Rekonstruktion überlagern.

Dementsprechend wird eine zweite holographische Aufnahme des reellen vergrößerten Zwischenbildes von dem nun definiert belasteten Objekt 1 auf derselben Hologrammplatte 6 gespeichert, diesmal aber in Interferenz mit einem zweiten Referenzstrahl II. Beide Referenzstrahlen strahlen unter 45° auf die Hologrammplatte 6 ein.

Die Hologrammplatte 6 wird z. B. auf photochemischen Wege entwickelt und zur Rekonstruktion wieder an die gleiche Position (x, y) wie zur Aufnahme (der zwei Interferenzbilder) gesetzt. Die Rekonstruktion erfolgt mit beiden Referenzwellen zugleich.

Bei der Rekonstruktion treten die beiden gespeicherten Hologramme, die sich durch das mechanische Verschiebungsfeld unterscheiden, in Interferenz zueinander und das entstehende Interferogramm wird mit der Videokamera 8 aufgenommen und in den Bildspeicher eines Bildverarbeitungssystems 10 gelesen.

In dem Referenz-Strahlenweg (I oder II) wird ein Phasenschieber (als Piezospiegel 11) angeordnet. Er wird über eine Steuereinrichtung 9 angesteuert, die von dem Bildverarbeitungssystem (BVS) 10 oder dem Programm gesteuert werden kann, das die rechnerische Auswertung der mehrfach belichteten Hologrammplatte 6 übernimmt.

Durch eine — z. B. über die Auswertesoftware des Rechners definierte — Ansteuerung des Piezospiegels 11 werden in einem der Referenzzweige definierte Phasenschiebungen durchgeführt. Diese bewirken eine Veränderung des Interferenzmusters, das vom Bildverarbeitungssystem (BVS) erfaßt wird.

In das Bildverarbeitungssystem 10 werden drei Bilder als jeweils unterschiedliche Interferogramme eingelesen und zur Auswertung herangezogen. Mit einfachen Algorithmen wird die Interferenzphase und das mechanische Verschiebungsfeld bestimmt und kann als 3-D-Plot dargestellt werden, wobei die Genauigkeit optimal $1/200$ der zur Aufnahme verwendeten Lichtwellenlänge beträgt. Durch die einfachen Algorithmen läßt sich außerdem eine hohe Geschwindigkeit bei der Auswertung erreichen. Die gesamte Auswertung inklusive der Entwicklung der Hologrammplatte kann in einer halben Stunde erfolgen.

Besonders eignet sich die berührungslose Messung der Objektveränderungen unterhalb der Lichtwellenlänge für die Mikro-Systemtechnik, z. B. die Verbindungstechniken (Bonding), die Mikromechanik, die Mikroelektronik. Mechanische Verschiebungen und thermisch verursachte Dehnungen können bei geringem Zeitaufwand — heute schon ohne die Zwischenschaltung einer Entwicklung der Hologrammplatte 6 — mit großer Genauigkeit bestimmt werden, gegebenenfalls

auch sichtbar gemacht werden.

Mit einer Verbesserung der Auflösung kann gerechnet werden, wenn eine aktive Streifenstabilisierung — zur Kompensation der Phasenvariationen durch Luftturbulenzen — eingesetzt wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zur berührungslosen Bestimmung (mechanischer) Spannungsfelder an diffus streuenden Meßobjekten (1), insbesondere mikroskopischer Dimension, bei dem

(a) auf einer Hologrammplatte (6) die vollständige erste optische Information über das (mechanisch) unbelastete Meßobjekt (1) aufgezeichnet wird;

(b) das Meßobjekt (1) mit einer Belastungseinrichtung (2) belastet (F) wird oder aufgrund von mechanischer oder thermischer Beanspruchung belastet wird und die vollständige zweite optische Information auf derselben Hologrammplatte (6) aufgezeichnet wird;

(c) die im Bild stabilisierte Hologrammplatte — z. B. nach Entwicklung oder dergleichen — an der Stelle der Aufzeichnung gleichzeitig mit zwei Referenzstrahlen (I, II) bestrahlt wird, um mit einem Bildverarbeitungs-System (10) die sich durch Interferenz bildenden Interferenzstreifenmuster auf der 3-D-Abbildung des Meßobjektes (1) aufzuzeichnen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem einer der Referenzstrahlen (I, II) bei der Messung gemäß (10) in seiner Phasenlage verändert wird, um die Interferenzstreifenmuster zu verändern.

3. Verfahren nach einem der erwähnten Ansprüche, bei dem die vollständige erste optische Information das Interferenzmuster aus dem vom Meßobjekt (1) — bei Bestrahlen mit kohärentem Licht — reflektierten Licht und einem ersten Referenzstrahl (I) ist, wobei die Interferenz in der Zwischenbildebene einer Abbildungsoptik der Bestrahlungseinrichtung (3, 4) erfolgt.

4. Verfahren nach einem der erwähnten Ansprüche, bei dem die vollständige zweite optische Information das Interferenzmuster aus dem vom Meßobjekt (1) — bei Bestrahlen mit kohärentem Licht — reflektierten Licht und einem zweiten Referenzstrahl (II) ist, wobei die Interferenz in der Zwischenbildebene einer Abbildungsoptik der Bestrahlungseinrichtung (3, 4) erfolgt.

5. Verfahren nach einem der erwähnten Ansprüche, bei dem mehrere, insbesondere drei Interferenzbilder bei verschiedenen relativen Phasenlagen des einen Referenzstrahles im Bildsystem (10) aufgezeichnet werden.

6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem die verschiedenen Phasenlagen äquidistant im 2π -Intervall der Lichtwellenlänge liegen.

7. Verfahren nach einem der erwähnten Ansprüche, bei dem aus den aufgezeichneten Interferenzstreifenmustern, insbesondere den mehreren Interferenzbildern, im Bild-Verarbeitungssystem das mechanische Verschiebungsfeld des Meßobjektes (1) im belasteten Zustand gegenüber dem (thermisch oder mechanisch) unbelasteten Zustand errechnet wird.

8. Verfahren nach einem der erwähnten Ansprüche, bei dem die von dem belasteten oder unbelasteten

Meßobjekt (1) kommenden Strahlen in einer — der Mikroskop-Optik nachgeschalteten — Tubuslinse (5) in ein divergentes Lichtbündel gewandelt wird.

9. Verfahren nach einem der erwähnten Ansprüche, bei dem die Interferometrie eine holographische Interferometrie ist. 5

10. Verfahren nach einem der erwähnten Ansprüche, bei dem die beiden Referenzstrahlen (I, II) unter denselben Winkeln auf die Hologrammplatte (6) einstrahlen. 10

11. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der erwähnten Ansprüche, bestehend aus:

(a) einer (mechanischen) Belastungseinrichtung (F, 2) mit der ein Meßobjekt (1) unter eine definierte mechanische Spannung setzbar ist oder entlastbar ist; 15

(b) einem an die holographische Interferometrie angepaßten Auflichtmikroskop (3, 4, 12, 13), um das belastete oder unbelastete Meßobjekt (1) zu beleuchten; 20

(c) einem 2-Referenzstrahl-Modul (14, 14b, 11, 9, 14, 14a), um einen der Referenzstrahlen eine definierte Phasenverschiebung gegenüber dem anderen zu geben; 25

(d) einem Bild-Verarbeitungssystem (10) zur Aufnahme der Interferenzbilder der mit zwei holographischen Interferenzbildern versehenen Hologrammplatte (6).

12. Anordnung nach Anspruch 11, bei der die mechanische Spannung Ursache einer thermisch oder mechanisch das Meßobjekt (1) belastenden Belastungseinrichtung (2, F) ist. 30

13. Mehrfach belichtete Hologrammplatte (6) für eine Anordnung nach Anspruch 11 oder 12 oder ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, bei der zwei verschiedene Hologramme von einem unterschiedlich belasteten mikroskopisch kleinem Objekt (1) ineinander aufgezeichnet sind. 35

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen 40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

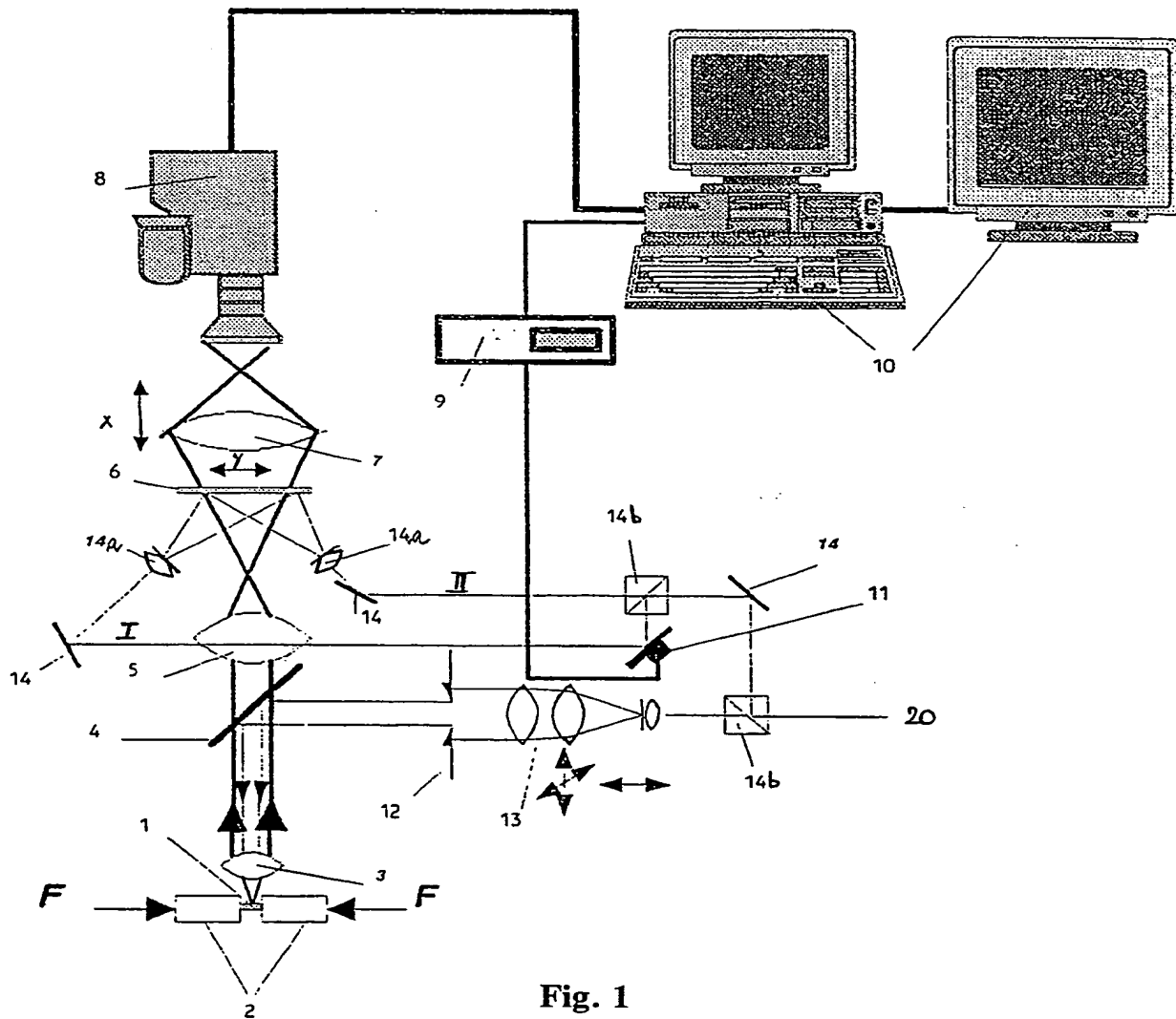


Fig. 1